



DOI: 10.29298/rmcf.v14i75.1297

Artículo Científico

Calidad de semilla y crecimiento de planta en poblaciones y altitudes de *Pinus hartwegii* Lindl.

Seed quality and plant growth in populations and altitudes of *Pinus hartwegii* Lindl.

José Luis Sánchez Mendoza¹, Marcos Jiménez Casas^{1*}, Carlos Ramírez Herrera¹, Héctor Viveros Viveros²

Fecha de recepción/Reception date: 19 de julio del 2022

Fecha de aceptación/Acceptance date: 29 de noviembre del 2022

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

²Universidad Veracruzana, Instituto de Investigaciones Forestales. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: marcosjc@colpos.mx

*Corresponding author; e-mail: marcosjc@colpos.mx

Resumen

La reproducción y el crecimiento de especies de alta montaña adaptadas a bajas temperaturas, podrían afectarse por el calentamiento global, particularmente en altitudes marginales donde el estrés es más intenso. En este estudio se evaluó la calidad de semilla y el crecimiento inicial en varios gradientes altitudinales de tres poblaciones (dos del Estado de México y una de Veracruz) de *Pinus hartwegii*, donde las semillas se recolectaron entre 3 400 y 4 100 msnm. El diseño experimental fue completamente al azar y se registraron datos de germinación de semillas, rompimiento del estado cespitoso y crecimiento de plantas. La capacidad germinativa de las semillas fue de 87 %, con valor pico de 3.2 y germinativo de 10.9, pero con variación significativa entre poblaciones y gradientes. La menor capacidad germinativa (50 %) se obtuvo con semillas procedentes del mayor gradiente altitudinal (4 100 m). El rompimiento del estado cespitoso varió según la población y altitud. Respecto a las plántulas de Veracruz, 75 % de ellas rompieron el estado cespitoso a los cinco meses de edad, en contraste con las del Estado de México, cuyo registro fue menor a 35 %. Referente a la altitud, las plantas procedentes del mayor intervalo prolongaron el rompimiento del estado cespitoso por más de dos meses, lo cual influyó en el bajo crecimiento inicial de las plantas. Lo anterior indica que la población de 4 000 m podría estar en declinación, a diferencia de los otros gradientes altitudinales que mostraron excelente calidad de semillas y crecimiento de plantas.

Palabras clave: Alta montaña, caracteres adaptativos, estado cespitoso, gradiente altitudinal, parámetros germinativos, reproducción.

Abstract

Reproduction and growth of high mountain species adapted to low temperatures could be affected by global warming, particularly at marginal altitudes where stress is more intense. This study evaluated seed quality and initial growth in various altitudinal gradients of three *Pinus hartwegii* populations (two in the State of Mexico and one in Veracruz State); seeds were collected between 3 400 and 4 100 masl. The experimental design was completely randomized and data on seed germination, cespitose stage breakage, and plant growth were recorded. Seed germination capacity was 87 %, with a peak value of 3.2 and germination of 10.9, but with significant variation among populations and gradients. The lowest germination capacity (50 %) was obtained

with seeds from the highest altitudinal gradient (4 100 m). The breakage of the cespitose stage varied according to population and altitude. Regarding the seedlings from *Veracruz*, 75 % of them broke the cespitose stage at five months of age, in contrast with those from the State of Mexico, where the percentage was below 35 %. Regarding altitude, the plants from the highest interval prolonged the break of the cespitose stage for more than two months, which influenced the low initial growth of the plants. This indicates that the 4 000 m population may be in decline, unlike the other altitudinal gradients, which exhibited excellent seed quality and plant growth.

Key words: High mountain, adaptive traits, cespitose stage, altitudinal gradient, germination parameters, reproduction.

Introducción

Pinus hartwegii Lindl. se localiza en el límite altitudinal de la vegetación arbórea (3 000-4 300 m) desde el noreste de México hasta la región norteña de El Salvador (Perry, 1991). En este intervalo altitudinal, la temperatura es variable. Los rodales ubicados en altitudes inferiores están expuestos a temperaturas más cálidas y con menor humedad, mientras que aquellos que se encuentran en los límites superiores son fríos y con heladas frecuentes (López-Toledo *et al.*, 2017). En respuesta a esa variación ambiental, las especies pueden desarrollar ciertas adaptaciones o mayor plasticidad fenotípica para sobrevivir y crecer (Di Pierro *et al.*, 2017). *P. hartwegii* presenta caracteres adaptativos que le permiten coexistir con eventos naturales de fuego y heladas (Robles-Gutiérrez *et al.*, 2016).

Por ser un taxón con distribución restringida y bien adaptado a las condiciones de alta montaña, el incremento de temperatura y baja humedad en su nicho limitarían su regeneración natural y amenazarían su permanencia (Ricker *et al.*, 2007). En los límites altitudinales superiores de Monte Tláloc, se observa mayor decremento en el reclutamiento de plantas de *P. hartwegii* debido a la pérdida de humedad en el suelo durante las últimas décadas (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017). Para otros pinos con distribución a menor altitud, la migración sería una alternativa, pero a *P.*

hartwegii solo le quedaría subir a sitios con suelos rocosos, poco profundos y escasa capacidad de retención de humedad (Gómez-Pineda *et al.*, 2020).

Por otro lado, la regeneración natural depende de la calidad de semilla (Cheng *et al.*, 2009). En *Abies georgei* Orr var. *smithii* (Viguié & Gausson) C. Y. Cheng, W. C. Cheng & L. K. Fu se determinó un decrecimiento en la producción y calidad de semilla a medida que se incrementa el gradiente altitudinal, lo cual se refleja en la baja regeneración y densidad de árboles en esas altitudes. Por ello, su migración hacia mayores altitudes es limitada (Wang *et al.*, 2016).

En especies sujetas a condiciones de estrés hídrico por tiempo prolongado, se afecta su fisiología reproductiva. Semillas vanas y pequeñas, embriones abortados o mal conformados y con estructuras deficientes se observan cuando los árboles reproductivos son expuestos a condiciones frecuentes de baja humedad (Lauder *et al.*, 2019).

En los bosques de *P. hartwegii*, diversas actividades antrópicas inciden negativamente en su regeneración natural y reducen la densidad de sus poblaciones al eliminarse los árboles productores de semilla con más frecuencia (Iglesias y Tivo, 2006; Espinoza-Martínez *et al.*, 2008). Además, se espera que la condición de sequía incremente la mortalidad y modifique la fenología reproductiva de la especie (Gómez-Pineda *et al.*, 2020). Esto podría dar lugar a la producción de semillas de baja calidad, y en consecuencia a plántulas deficientes para su establecimiento (Aguilar *et al.*, 2019), por lo que determinar la calidad de semilla que se produce en diferentes gradientes altitudinales, es preponderante para el manejo del taxón.

En las coníferas, la calidad de semilla es un indicador del éxito reproductivo que permite conocer el estatus de la población para proponer estrategias de conservación (Castilleja *et al.*, 2016). La calidad de semilla se define tanto por la capacidad de germinación (porcentaje de semillas germinadas en un lapso de tiempo), como por el vigor (la velocidad de germinación) (Navarro *et al.*, 2015). Por lo tanto, entre más

rápida y homogénea sea la germinación, el vigor y la uniformidad de la planta producida serán mayores (Hernández-Anguiano *et al.*, 2018).

El crecimiento cespitoso que experimentan las plántulas de *P. hartwegii*, se puede prolongar por varios años debido al disturbio y a la competencia con especies arbustivas invasivas, que evitan su establecimiento (Jin *et al.*, 2019). Los taxones invasivos son favorecidos ante condiciones de disturbio y del cambio climático, por ello, el rompimiento rápido del estado cespitoso de las plantas es deseable. No obstante, este es variable y depende de las condiciones de su hábitat; en algunas poblaciones, las plantas procedentes de límites altitudinales superiores se mantienen en estado cespitoso por más tiempo que las de menor altitud (Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

El objetivo del presente trabajo fue analizar la condición altitudinal en la calidad de semilla y el crecimiento inicial de plántulas de *P. hartwegii* procedentes de dos poblaciones del Estado de México y una de Veracruz. Se considera que la semilla producida por árboles localizados en las zonas de altitud marginal, baja y alta, mostrarán menor calidad. por tanto, plantas de menor crecimiento en contraste con aquella procedente de árboles localizados en sitios altitudinales intermedios.

Materiales y Métodos

Material vegetal

La recolecta de semilla de *P. hartwegii* se realizó entre los años 2017 y 2018 en dos poblaciones naturales del Estado de México (Monte Tláloc y Nevado de Toluca) y de Veracruz (Cofre de Perote). En cada población, se consideraron para la recolecta varios sitios con diferente nivel altitudinal (Cuadro 1). En los sitios se recolectaron conos (estróbilos maduros) de 5 a 15 árboles en función de la densidad, la distribución espacial y la distancia entre ellos (100 m cuando fue posible). La selección de los individuos se basó en la presencia de conos y ausencia de plagas.

Cuadro 1. Localización geográfica de las poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl. del Estado de México y Veracruz, y número de árboles muestreados por sitio.

Población	Número de árboles	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Monte Tláloc, Estado de México	5	3 600	19°24'04.48"	98°44'11.55"
	5	3 700	19°24'52.11"	98°44'29.66"
Nevado de Toluca, Estado de México	5	3 900	19°07'47.79"	99°46'50.31"
	5	4 000	19°07'25.66"	99°46'43.77"
	5	4 100	19°07'18.93"	99°45'11.85"
Cofre de Perote, Veracruz	15	3 400	19°31'13.33"	97°09'49.65"
	15	3 600	19°31'13.33"	97°09'51.31"
	15	3 800	19°30'19.42"	97°09'31.37"
	15	4 000	19°29'44.47"	97°09'09.27"

Los conos recolectados de cada árbol fueron trasladados al laboratorio para la extracción de semillas, donde posteriormente se colocaron en una columna de aire para separarlas por peso. Las semillas vanas (sin megagametofito y embrión) flotaron y se eliminaron, mientras que las llenas se quedaron en la base de la columna y se llevaron a refrigeración (4 a 6 °C).

Germinación

El estudio se realizó durante la primera semana de febrero de 2019 en el invernadero del Posgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados. En un diseño completamente al azar, se estableció el experimento en el cual, para cada nivel altitudinal (nueve en total), se utilizaron cuatro réplicas de 100 semillas de *P. hartwegii* para un total de 3 600 semillas.

Primero, la semilla se germinó en tubete forestal de 310 mL (una semilla por tubete), previamente llenados con una mezcla de *peat moss*, agrolita y vermiculita (3:1:1, respectivamente). Las semillas se mantuvieron sobre la superficie del sustrato sin cubrirlas totalmente, solo dentro de un hueco pequeño. Después, los tubetes se colocaron en charolas de 54 cavidades y se mantuvieron en condiciones de invernadero, con una temperatura promedio de 24 ± 12 °C. La humedad del sustrato fue constante, mediante riegos. La germinación se registró diariamente, durante un periodo de 30 días. Una vez que la semilla germinó, se enterró en el sustrato.

Con los datos de germinación se calculó: 1) El porcentaje de germinación (capacidad germinativa (CG)= $(\text{semillas germinadas}/\text{semillas totales}) \times 100$); 2) El valor pico (VP), el valor máximo de la sumatoria del porcentaje de germinación dividido por el número de días en la evaluación y el número de días para alcanzar 50 % de la germinación total lograda; y 3) El valor germinativo (VG) como el valor pico multiplicado por la germinación promedio (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021).

Las plántulas producidas permanecieron en condiciones de invernadero, y el riego se les proporcionó cada cuatro días, o antes cuando lo requirieron.

Evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas

Para esta fase del experimento, en la primera semana de marzo de 2019, se tomó una muestra de 60 plantas por nivel altitudinal y se distribuyeron en cuatro réplicas de 15 plantas bajo un diseño completamente al azar. En cada planta se midió el diámetro a la base (*DB*) y la altura total (*AT*). Posteriormente, durante la última semana de octubre de 2019, se registró el número de hojas cotiledonares (*NHC*), el rompimiento del estado cespitoso, es decir, la emisión y alargamiento de epicótilo, que se evaluó como el porcentaje de plantas con (*PCC*) y sin estado cespitoso (*PSC*), y el diámetro de la yema apical (*DY*). El *DB* y *AT* se obtuvieron con un vernier digital Mitutoyo® modelo 500-702 ($\pm 0.01\text{mm}$) y una regla graduada Abacus® ($\pm 0.1\text{ cm}$), respectivamente. El crecimiento en *DB* y *AT* se calculó a partir de las diferencias entre las mediciones iniciales y las finales.

Análisis estadístico

Los datos de las variables se sometieron a las pruebas de *Shapiro-Wilk* y de *Bartlett* para verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, respectivamente, con los procedimientos *UNIVARIATE* y *GLM* mediante el paquete estadístico *SAS/PC* para *Windows* versión 9.4 (*SAS Institute*, 2003). Como los datos de *CG* no cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, entonces se optó por usar la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis*.

Los otros parámetros germinativos cumplieron la normalidad ($p \geq 0.0714$) y homogeneidad de varianzas ($p \leq 0.3356$), por tanto, se analizaron mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS® (SAS Institute, 2003) con el modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + P_j + A_{k(i)} + E_{ijk} \quad (1)$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor de la característica de la k -ésima altitud anidado en la j -ésima población en la i -ésima repetición

μ = Efecto de la media general

R_i = Efecto aleatorio de la i -ésima repetición

P_j = Efecto de la j -ésima población

A_k = Efecto de la K -ésima altitud dentro de la j -ésima población

e_{ijk} = Error experimental

Los datos de *DB*, *AT*, *NHC*, *DY* y *PSC* después de verificar los supuestos de normalidad ($p \geq 0.772$) y homogeneidad de varianzas ($p \geq 0.0994$), se analizaron con el procedimiento *MIXED* del paquete estadístico SAS® (SAS Institute, 2003) a través del modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + A_{k(i)} + E_{ijk} \quad (2)$$

Donde:

Y_i = Valor de la característica de la k -ésima altitud anidado en la i -ésima población

μ = Efecto de la media general, P_i es el efecto de la i -ésima población

A_k = Efecto fijo de la K -ésima altitud dentro de la i -ésima población

e_{ijk} = Error experimental

Finalmente, la separación de medias se realizó con la prueba de *Tukey* ($p=0.05$).

Resultados y Discusión

Germinación

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre las tres poblaciones para los parámetros germinativos evaluados, excepto para el valor pico, mientras que, entre las altitudes, si hubo diferencias en todos los parámetros (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de p para los parámetros germinativos de las semillas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de diferentes poblaciones y altitudes.

Fuente de variación	Capacidad germinativa	Valor pico	Valor germinativo
Población	0.3791	0.0001	0.62
Altitud	0.0034	0.0004	0.0001

En general, el porcentaje promedio de la capacidad germinativa para las semillas de las tres poblaciones estudiadas estuvo por arriba de 85 %. Aunque no hubo diferencias significativas entre las poblaciones, las de Nevado de Toluca registraron alrededor de 10 % menos germinación en relación a las otras dos poblaciones (Cuadro 3). El valor pico presentó diferencias entre poblaciones: las semillas de Cofre de Perote fueron 11 % superiores a los valores de las otras dos poblaciones (Cuadro 3). De cualquier manera, los parámetros germinativos favorables con ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las tres poblaciones, sugieren buena calidad de semilla. Resultados similares registraron Ortega-Mata *et al.* (2003) con valores superiores a 90 % de germinación para varias poblaciones de *P. hartwegii* localizadas en el Estado de México.

Cuadro 3. Comparación de medias (\pm error estándar) de los parámetros germinativos de la semilla de *Pinus hartwegii* Lindl. procedente de diferentes poblaciones y altitudes.

Altitud (m)	Capacidad germinativa %	Valor pico	Valor germinativo
CP 3 400	95.45 \pm 2.82 a	3.08 \pm 0.11 c	10.79 \pm 0.14 e
CP 3 600	91.81 \pm 2.12 a	3.46 \pm 0.28 b	12.02 \pm 0.70 d
CP 3 800	94.54 \pm 2.82 a	3.12 \pm 0.17 c	10.97 \pm 0.68 e
CP 4 000	87.27 \pm 1.60 b	3.90 \pm 0.15 a	12.46 \pm 0.70 c
Media CP	92.27 \pm 3.67 a	3.52 \pm 0.38 a	11.56 \pm 0.79 a
MT 3 600	84.54 \pm 2.82 b	2.55 \pm 0.65 d	9.11 \pm 0.07 e
MT 3 700	98.18 \pm 2.12 a	3.71 \pm 0.22 b	13.58 \pm 0.70 b
Media MT	91.36 \pm 9.64 a	3.13 \pm 0.77 b	11.34 \pm 2.35 a
NT 3 900	90.90 \pm 1.97 b	3.55 \pm 0.28 b	12.17 \pm 0.41 c
NT 4 000	95.45 \pm 2.73 b	4.08 \pm 0.11 a	14.21 \pm 0.70 a
NT 4 100	50.90 \pm 2.75 a	1.65 \pm 0.21 e	3.31 \pm 0.07 f
Media NT	79.08 \pm 24.51 a	3.11 \pm 1.15 b	9.89 \pm 5.04 a
General	87.6	3.2	10.9

CP = Cofre de Perote; MT = Monte Tláloc; NT = Nevado de Toluca. Letras diferentes en la misma columna (poblaciones y altitudes) indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

En Cofre de Perote se tienen porcentajes de germinación de 80 a 95 % (Tejeda-Landero *et al.*, 2019). Porcentajes de germinación mayores a 75 % indican buena calidad de semilla (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021). Al respecto, en estudios de semilla procedente de un huerto semillero de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. se señaló que tanto el valor pico como el germinativo, son buenos indicadores de la calidad de la semilla producida (Gómez *et al.*, 2010). En la presente investigación, la capacidad germinativa registrada en las tres poblaciones puede reflejar la buena calidad de sitio. Sitios ricos en nutrientes favorecen la producción de semilla al proporcionar los recursos necesarios para su desarrollo (Lauder *et al.*, 2019).

En la selección y establecimiento de áreas semilleras, la calidad del sitio es un factor que se considera, ya que con ello se asegura la producción de semilla en cantidad y calidad de los árboles conservados de estas áreas (Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2019). Además del sitio, algunas variables ambientales, particularmente la precipitación, influyen en los procesos reproductivos que definen la formación y producción de semilla (Andrade-Gómez *et al.*, 2021), por lo que el monitoreo de esos factores será necesario para obtener mayor información de su impacto en la reproducción y conservación de la especie.

Aunque con los resultados obtenidos se podría descartar algún problema que afecte la calidad de semilla por poblaciones de *P. hartwegii* reducidas (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021), se requiere la realización de un estudio con mayor detalle en aspectos de censo forestal en las tres poblaciones para analizar el estatus de índices reproductivos y su relación con los procesos de regeneración natural.

Respecto a los niveles altitudinales, todos los valores de los parámetros estudiados también resultaron altos e indicaron una buena calidad de semilla producida en los rodales localizados en diferentes altitudes, excepto para el rodal de Nevado de Toluca, localizado en la región más alta (4 100 m). En este sitio, la capacidad germinativa, el valor pico y el valor germinativo de las semillas decreció en más de 42, 36 y 63 %, respectivamente, en comparación a los valores registrados en las otras altitudes (Cuadro 3).

En un trabajo sobre la relación entre la variación ambiental en diferentes altitudes y los atributos reproductivos de *Pinus pseudostrobus* Lindl., se determinó que la germinación de la semilla de poblaciones ubicadas en sus límites altitudinales superiores decreció en una proporción de aproximadamente 3:1 con respecto a las de límites intermedios, y el estrés por sequía fue señalado entre las causas del decremento (López-Toledo *et al.*, 2017).

La mala calidad de semilla se ha explicado por la pobre humedad existente en el suelo (Lauder *et al.*, 2019). En gradientes altitudinales superiores, como a los 4 100 m, los suelos son pedregosos y con baja capacidad de retención de agua. Además, en estas altitudes, las heladas y vientos fríos fuera de temporada causan daños y pérdida de yemas reproductivas (Trant *et al.*, 2018). Por lo tanto, esos factores de estrés abiótico podrían causar la pobre calidad de semilla producida en el sitio situado a 4 100 msnm.

Estos resultados indican que la altitud influye en los procesos reproductivos de *P. hartwegii*, lo cual debe asociarse con las variables ambientales que ocurren en cada altitud y que son causantes de estrés con impacto directo en las poblaciones. En los límites altitudinales, el estrés ambiental es más extremo, además de que las poblaciones están más expuestas (nevadas, heladas y viento) y los suelos, generalmente, son pobres en nutrientes. Por ello, para conservar poblaciones de *P. hartwegii* localizadas cerca del pastizal alpino, como la localizada a 4 100 m, es necesario implementar programas de manejo en el mediano y largo plazo que

incluyan evitar tala de árboles, fertilización programada en árboles reproductivos para mejorar la producción de semilla en calidad y cantidad, estudiar la dinámica de los bancos de semillas de los rodales, protección de la regeneración natural, y considerar la regeneración asistida.

Crecimiento en plantas de *Pinus hartwegii*

Las características de crecimiento evaluadas en las plantas de *P. hartwegii* presentaron diferencias estadísticamente significativas entre poblaciones y altitudes, excepto para el número de hojas cotiledonares (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de p del ANOVA estimados para el crecimiento de plantas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de diferentes poblaciones y altitudes.

Fuente de variación	<i>NHC</i>	<i>Altura total</i>	<i>Diámetro a base</i>	<i>Diámetro de Yema</i>	<i>PSC</i>
Población	0.06	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Altitud	0.05	0.0001	0.0001	0.0117	0.0001

NHC = Número de hojas cotiledonares; *PSC* = Plantas sin estado cespitoso.

El número de hojas cotiledonares no presentó variación entre poblaciones y altitudes, el promedio fue de 5 cotiledones por plántula. Las altitudes inferiores (3 400 y 3 600 m) tuvieron los valores promedio de cotiledones ligeramente más bajos (Cuadro 5). La falta de variación en el número de cotiledones es poco común debido a que, en las especies de coníferas durante las primeras etapas de desarrollo, hay una gran

variación en el número de cotiledones, y se considera como un carácter importante para la detección de variación genética, además de que se relaciona con el crecimiento inicial de la plántula (Romanovskii y Morozov, 2019).

Cuadro 5. Medias (\pm error estándar) de las características morfológicas y de crecimiento de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de diferentes poblaciones y niveles altitudinales.

Población /Altitud	NHC	AT (cm)	DB (mm)	DY (mm)	PSC (%)
CP 3 400	4.83 \pm 0.11 a	9.21 \pm 0.40 a	6.76 \pm 0.20 de	4.42 \pm 0.17 a	51.00 \pm 2.50 c
CP 3 600	4.96 \pm 0.14 a	8.81 \pm 0.26 a	6.48 \pm 0.13 e	4.18 \pm 0.06 b	63.00 \pm 1.06 b
CP 3 800	5.29 \pm 0.21 a	9.82 \pm 0.32 a	7.07 \pm 0.15 d	4.30 \pm 0.09 ab	84.00 \pm 1.41 a
CP 4 000	5.09 \pm 0.08 a	8.76 \pm 0.27 b	7.17 \pm 0.22 d	4.37 \pm 0.14 a	81.00 \pm 1.42 a
Media CP	5.03 \pm 0.07 a	9.15 \pm 0.17 a	6.87 \pm 0.10 c	4.30 \pm 0.06 a	69.75 \pm 7.78a
MT 3 600	5.07 \pm 0.03 a	5.71 \pm 0.50 d	8.71 \pm 0.14 a	3.90 \pm 0.14 c	19.00 \pm 0.50 ef
MT 3 700	5.27 \pm 0.06 a	6.84 \pm 0.31 c	9.01 \pm 0.12 a	3.95 \pm 0.15 c	24.50 \pm 1.50 e
Media MT	5.19 \pm 0.04 a	6.32 \pm 0.33 b	8.86 \pm 0.10 a	3.97 \pm 0.10 b	22.10 \pm 2.75 c
NT 3 900	5.75 \pm 0.31 a	7.27 \pm 0.29 bc	8.06 \pm 0.19 b	3.93 \pm 0.06 c	45.50 \pm 1.63 c
NT 4 000	5.81 \pm 0.26 a	6.66 \pm 0.28 cd	8.52 \pm 0.09 b	4.12 \pm 0.17 bc	39.50 \pm 1.22 d
NT 4 100	5.55 \pm 0.05 a	5.48 \pm 0.24 d	7.95 \pm 0.21 bc	3.81 \pm 0.09 c	17.50 \pm 0.81 f
Media NT	5.75 \pm 0.43 a	6.65 \pm 0.24 b	8.18 \pm 0.11 b	4.28 \pm 0.07 a	34.20 \pm 8.51 b

CP = Cofre de Perote; MT = Monte Tlálloc; NT = Nevado de Toluca; NHC = Número de hojas cotiledonares; AT = Altura total; DB = Diámetro en la base; DY = Diámetro de la yema; PSC = Plantas sin estado cespitoso. Letras diferentes en la misma columna (poblaciones y altitudes) indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

En general, las plantas iniciaron el rompimiento del estado cespitoso (alargamiento del epicótilo) cuando tenían cinco meses de edad. Al final del experimento, el porcentaje de rompimiento fue diferente entre poblaciones y altitudes. Entre las poblaciones, el porcentaje de rompimiento más alto (aproximadamente 70 %) se obtuvo con las plantas de Cofre de Perote, que superaron en más de 30 % a las de

Monte Tláloc, que resultaron las de menor porcentaje de rompimiento (Cuadro 5). Por otro lado, entre altitudes no se observó una tendencia en el rompimiento entre las plantas procedentes de menor y mayor altitud, aunque hubo diferencia significativa entre ellas. Los menores porcentajes de rompimiento se presentaron en la altitud de 3 600 m de Monte Tláloc y a 4 100 m de Nevado de Toluca. En ambas altitudes, el porcentaje de rompimiento se redujo en más de 70 % con respecto a las de Cofre de Perote (3 800 y 4 000 m), que resultaron con los valores más altos (Cuadro 5).

Lo anterior permite deducir que en el rompimiento del estado cespitoso de *P. hartwegii*, las condiciones del sitio pueden tener mayor influencia que la altitud. El estado cespitoso se considera como un carácter adaptativo, adquirido para sobrevivir ante incendios y condiciones de sequía (Robles-Gutiérrez *et al.*, 2016). La variación observada en el rompimiento del estado cespitoso entre poblaciones y altitudes, evidencia la existencia de diferentes niveles de control genético en cada población, probablemente, influenciado por las diversas condiciones (temperatura, humedad, incidencia de incendios) imperantes en cada altitud (Harsch y Bader, 2011).

Las ventajas y desventajas del rompimiento rápido del estado cespitoso deben evaluarse en condiciones de campo, donde la vulnerabilidad de las plantas cespitosas de *P. hartwegii* esté expuesta a los cambios de temperatura, sequía y a la competencia entre especies del ecosistema. Aunque la condición cespitosa confiere resistencia a factores de estrés abiótico (Dixit *et al.*, 2020), también se ha documentado que, si el estado cespitoso se prolonga por algunos años, se arriesga la supervivencia de las plantas debido a la competencia ecológica de especies de rápido crecimiento (Jin *et al.*, 2019). Asimismo, se demostró que en condiciones de sequía, las plantas de *Pinus palustris* Mill. en estado cespitoso fueron muy vulnerables como consecuencia de su potencial hídrico, turgencia celular y fotosíntesis, declinando rápidamente cuando el estrés hídrico se prolonga (Hart *et*

al., 2020). Las plantas de 3 600 m de Monte Tláloc y de 4 100 m de Nevado de Toluca, con prolongado estado cespitoso, podrían estar en problemas si se presentan con frecuencia eventos de sequía y competencia.

Las plantas de *P. hartwegii* de Cofre de Perote destacaron por su crecimiento en altura. Estas resultaron 25 % más altas y con un tamaño de yema apical superior a 85 % en comparación con las de Monte Tláloc (las de menor altura entre las poblaciones), pero con diámetro menor a 20 % que las de Nevado de Toluca (Cuadro 5). Benavides *et al.* (2011) señalan una diferencia similar en el crecimiento de diámetro y altura en plantas de *P. hartwegii* de Cofre de Perote respecto a poblaciones del Estado de México y Ciudad de México. Lo anterior se explica por el rápido rompimiento del estado cespitoso que presentaron las plantas procedentes de Cofre de Perote, lo cual les permitió crecer más rápido y aprovechar mejor sus recursos. En plantas que salen más rápido del estado cespitoso, la mayor cantidad de sustancias de reserva son destinadas al crecimiento en longitud (alargamiento de epicótilo) y desarrollo de yema apical, mientras que las plantas en estado cespitoso con nulo o poco crecimiento en altura, destinan sus recursos al crecimiento del diámetro (base de tallo) y raíz (O'Brien *et al.*, 2008).

En un estudio sobre el estado cespitoso de las plántulas de *P. palustris* se concluyó que, si el estado cespitoso permanece por varios años, el vigor de las plantas decrece (por competencia con otras especies y por enfermedades), con la consecuente amenaza para su supervivencia, además, factores de estrés como la sequía prolongan la condición cespitosa por varios años (Jin *et al.*, 2019).

En cuanto al diámetro de la yema apical, las plantas de Monte Tláloc resultaron ligeramente más pequeños (3.9 mm) que los de las otras dos poblaciones (>4.0 mm). Esto coincide con el parámetro del rompimiento del estado cespitoso, donde las de Monte Tláloc mostraron el más bajo. Es probable que el tamaño de la yema indique una mayor actividad mitótica, previo a la elongación del hipocótilo, procesos que son influenciados por el ambiente. En particular, las poblaciones de coníferas tienden a

diferenciarse genéticamente, y sus patrones de crecimiento, tales como la formación y elongación de la yema, están adaptados a los cambios en los rangos de temperatura ambiental para evitar daños severos y muerte celular (Dixit y Kolb, 2020).

Entonces, las poblaciones de Nevado de Toluca localizadas en altitudes superiores extremas (4 100 m), estarían en mayor riesgo, no solo por la pobre germinación, el bajo rompimiento de estado cespitoso y su lento crecimiento, sino también por las predicciones de los modelos climatológicos para esta localidad, que pronostican condiciones de baja precipitación y alta temperatura (Manzanilla *et al.*, 2019).

Conclusiones

La semilla de *Pinus hartwegii* producida por los árboles de las tres poblaciones estudiadas muestra buena calidad, independientemente del nivel altitudinal del sitio. Semilla de baja calidad solo se produjo por los árboles localizados en el sitio de mayor altitud (4 100 m) de Nevado de Toluca, lo que sugiere una mayor atención a estas poblaciones para analizar las causas del deterioro en la semilla. La aceleración del rompimiento del estado cespitoso e inicio del crecimiento en altura de las plántulas de *P. hartwegii*, depende de la población y del nivel altitudinal, lo cual indica una variación adaptativa en función de las condiciones del sitio.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada al primer autor para realizar sus estudios de maestría.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Luis Sánchez Mendoza: desarrollo de la investigación, toma de datos, análisis estadístico, estructura y diseño del manuscrito; Marcos Jiménez Casas: diseño, supervisión del experimento, análisis de los resultados, redacción y corrección del manuscrito; Carlos Ramírez Herrera: diseño, supervisión del experimento, asesoría y corrección del manuscrito; Héctor Viveros Viveros: supervisión, asesoría y corrección del manuscrito.

Referencias

Aguilar, R., E. J. Cristóbal-Pérez, F. J. Balvino-Olvera, M. de J. Aguilar-Aguilar, ... and M. Quesada. 2019. Habitat fragmentation reduces plant progeny quality: a global synthesis. *Ecology Letters* 22(7):1163-1173. Doi: 10.1111/ele.13272.

Andrade-Gómez, K. A., C. Ramírez-Herrera, J. López-Upton, M. Jiménez-Casas y R. Lobato-Ortiz. 2021. Indicadores reproductivos en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(2):183-189.

<https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/44-2/6a.pdf>. (25 de noviembre de 2021).

Astudillo-Sánchez, C. C., J. Villanueva-Díaz, A. R. Endara-Agramont, G. E. Nava-Bernal y M. Á. Gómez-Albores. 2017. Influencia climática en el reclutamiento de *Pinus hartwegii* Lindl. del ecotono bosque-pastizal alpino en Monte Tláloc, México. *Agrociencia* 51(1):105-118. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n1/1405-3195-agro-51-01-00105.pdf>. (8 de febrero de 2022).

Benavides M., H. M., M. O. Gazca G., S. F. López L., F. Camacho M., ... y F. Nepamuceno M. 2011. Crecimiento inicial en plántulas de 12 procedencias de *Pinus hartwegii* Lindl. bajo condiciones de vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(5):73-90. Doi: 10.29298/rmcf.v2i5.584.

Capilla-Dinorin, E., J. López-Upton, M. Jiménez-Casas y V. Rebolledo-Camacho. 2021. Características reproductivas y calidad de semilla en poblaciones fragmentadas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andersen. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(2):211-219. Doi: 10.35196/rfm.2021.2.211.

Castilleja S., P., P. Delgado V., C. Sáenz-Romero and Y. Herrerías D. 2016. Reproductive success and inbreeding differ in fragmented populations of *Pinus rzedowskii* and *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, two endemic Mexican pines under threat. *Forests* 7(8):178-194. Doi: 10.3390/f7080178.

Cheng, J., L. Zhao and J. Cheng. 2009. Seed quality and forest regeneration of a 60-year *Quercus liaotungensis* forest in the Ziwuling region, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University* 31(2):10-16. <http://j.bjfu.edu.cn/en/article/id/8719>. (16 de enero de 2022).

Di Pierro, E. A., E. Mosca, S. C. González-Martínez, G. Binelli, D. B. Neale and N. La Porta. 2017. Adaptive variation in natural Alpine populations of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) at regional scale: Landscape features and altitudinal

- gradient effects. *Forest Ecology and Management* 405:350-359. Doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.045.
- Dixit, A. and T. Kolb. 2020. Variation in seedling budburst phenology and structural traits among southwestern ponderosa pine provenances. *Canadian Journal of Forest Research* 50(9):872–879. Doi: 10.1139/cjfr-2019-0333.
- Dixit, A., T. Kolb and O. Burney. 2020. Provenance geographical and climatic characteristics influence budburst phenology of southwestern ponderosa pine seedlings. *Forests* 11(10):1067-1076. Doi: 10.3390/f11101067.
- Espinoza-Martínez, L. A., D. A. Rodríguez-Trejo y F. J. Zamudio-Sánchez. 2008. Sinecología del sotobosque de *Pinus hartwegii* dos y tres años después de quemas prescritas. *Agrociencia* 42(6):717-730. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v42n6/v42n6a11.pdf>. (25 de octubre de 2021).
- Gómez J., D. M., C. Ramírez H., J. Jasso M. y J. López U. 2010. Variación en características reproductivas y germinación de semillas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(4):297-304. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61015520003>. (16 de enero de 2022).
- Gómez-Pineda, E., C. Sáenz-Romero, J. M. Ortega-Rodríguez, A. Blanco-García, ... and G. E. Rehfeldt. 2020. Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications Ecological Society of America* 30(2):e02041. Doi: 10.1002/eap.2041.
- Harsch, M. A. and M. Y. Bader. 2011. Treeline form -a potential key to understanding treeline dynamics. *Global Ecology and Biogeography* 20(4):582-596. Doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00622.x.
- Hart, J., K. O'Keefe, S. P. Augustine and K. A. McCulloh. 2020. Physiological responses of germinant *Pinus palustris* and *P. taeda* seedlings to water stress and the significance of the grass-stage. *Forest Ecology and Management* 458(15):1-32. Doi: 10.1016/j.foreco.2019.117647.

Hernández-Anguiano, L. A., J. López-Upton, C. Ramírez-Herrera y A. Romero-Manzanares. 2018. Variación en germinación y vigor de semillas de *Pinus cembroides* y *Pinus orizabensis*. *Agrociencia* 52(8):1161-1178. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n8/1405-3195-agro-52-08-1161-en.pdf>. (27 de noviembre de 2021).

Iglesias A., L. G. y Y. Tivo F. 2006. Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai* 2(2):449-468. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46120208>. (17 de noviembre de 2021).

Jin, S., B. Moule, D. Yu and G. G. Wang. 2019. Fire survival of longleaf pine (*Pinus palustris*) grass stage seedlings: the role of seedling size, root collar position, and resprouting. *Forests* 10(12):1-12. Doi: 10.3390/f10121070.

Lauder, J. D., E. V. Moran and S. C. Hart. 2019. Fight or flight? Potential tradeoffs between drought defense and reproduction in conifers. *Tree Physiology* 39(7):1071-1085. Doi: 10.1093/treephys/tpz031.

López-Toledo, L., M. Heredia-Hernández, D. Castellanos-Acuña, A. Blanco-García and C. Sáenz-Romero. 2017. Reproductive investment of *Pinus pseudostrobus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests* 48:867-881. Doi: 10.1007/s11056-017-9602-8.

Manzanilla Q., U., P. Delgado V., J. Hernández R., A. Molina S., J. J. García M. y M. del C. Rocha G. 2019. Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana* (126):e1398. Doi: 10.21829/abm126.2019.1398.

Manzanilla-Quiñones, U., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza y J. I. Yerena-Yamallel. 2019. Distribución actual y futura del bosque

subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. Madera y Bosques 25(2):e2521804. Doi: 10.21829/myb.2019.2521804.

Navarro, M., G. Febles and R. S. Herrera. 2015. Vigor: essential element for seed quality. Cuban Journal of Agricultural Science 49(4):447-458. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193045908003.pdf>. (11 de octubre de 2022).

O'Brien, J. J., J. K. Hiers, M. A. Callaham, R. J. Mitchell and S. B. Jack. 2008. Interactions among overstory structure, seedling life-history traits, and fire in frequently burned neotropical pine forests. *Ambio* 37(7):542-547. Doi: 10.1579/0044-7447-37.7.542.

Ortega-Mata, A., L. Mendizábal-Hernández, J. Alba-Landa y A. Aparicio R. 2003. Germinación y crecimiento inicial de *Pinus hartwegii* Lindl. de siete poblaciones del Estado de México. *Foresta Veracruzana* 5(2):29-34. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750205.pdf>. (9 de diciembre de 2021).

Perry, J. P. 1991. *The Pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, OR, USA. 231 p.

Ricker, M., G. Gutiérrez-García and D. C. Daly. 2007. Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in México. *Canadian Journal of Forest Research* 37(5):977-989. Doi: 10.1139/X06-304.

Robles-Gutiérrez, C. A., A. Velázquez-Martínez, D. A. Rodríguez-Trejo, V. J. Reyes-Hernández y J. D. Etchevers-Barra. 2016. Probability of mortality by fire damage of young *Pinus hartwegii* Lindl. trees in the Izta-Popo National Park. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2):165-178. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.08.034.

Romanovskii, M. G. and G. P. Morozov. 2019. Cotyledons of seedlings and embryos of conifers. *Lesovedenie* (6):573-579. Doi: 10.1134/S002411481906007X.

SAS Institute. 2003. *SAS version 9.0 for Windows*. Cary, NC, USA. SAS Institute, Inc.

Tejeda-Landero, V. M., L. R. Sánchez-Velásquez, H. Viveros-Viveros, A. Aparicio-Rentería and R. Flores-Peredo. 2019. Seed bank formation and removal of *Pinus hartwegii* (*pinaceae*) seeds along an altitudinal gradient in the Cofre de Perote National Park, Veracruz, Mexico. *Botanical Sciences* 97(4):623-629. Doi: 10.17129/botsci.2204.

Trant, A. J., R. G. Jameson and L. Hermanutz. 2018. Variation in reproductive potential across a multi-species treeline. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 50(1):e1524191. Doi: 10.1080/15230430.2018.1524191.

Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez-Valverde y A. Santacruz-Varela. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(3):836-842. Doi: 10.1016/j.foreco.2008.10.021.

Wang, J., J. Feng, B. Chen, P. Shi, ... and L. Ding. 2016. Controls of seed quantity and quality on seedling recruitment of smith fir along altitudinal gradient in southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science* 13(5):811-821. Doi: 10.1007/s11629-015-3761-x.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.